Die Registrierung der durch fallende Gewichte erzeugten Bodenschwingungen mit einem zweimillionenfach vergrößernden Wiechertschen Vertikalseismometer

---

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Georg-August-Universität zu Göttingen

Vorgelegt von

Ferdinand Hubert

aus Göttingen

Göttingen 1925

Referent: Herr Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. E. Wiechert.
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Dezember 1924.

Die Dissertation ist in der Zeitschrift für Geophysik, I. Jahrgang 1924/25, im Druck erschienen. Der erste Teil in Heft 4, S. 134—143, der zweite Teil in Heft 5, S. 197—209.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meiner lieben Mutter
und dem Andenken meines lieben Vaters

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548122_0002

Die Registrierung der durch fallende Gewichte erzeugten Bodenschwingungen mit einem zweimillionenfach vergrößernden Wiechertschen Vertikalseismometer.

(Göttinger Seismische Untersuchungen.)

Von **F. Hubert** in Göttingen. — (Mit drei Abbildungen.)

Die Arbeit bildet den ersten Teil einer von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen angenommenen Doktordissertation. Es werden die benutzten Apparate beschrieben; die Bodenunruhe wird so weit behandelt, als sie sich bei den Versuchen störend bemerkbar machte; drei Sprengversuche ergeben eine Abhängigkeit der Fernwirkung von der Lagerung des Sprengstoffes und gestatten die Bestimmung der Laufgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen an der Beobachtungsstelle zu annähernd 1700 m/sec.

§ 1. Einleitung. In den Jahren 1921/22 ist im Göttinger Geophysikalischen Institut von Herrn Geheimrat Wiechert mit Mitteln der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft ein zweimillionenfach vergrößerndes Vertikalseismometer konstruiert worden zur Registrierung schneller Bodenschwingungen. Ich übernahm es, mit diesem Seismometer die Bodenerschütterungen zu untersuchen, die durch frei fallende Gewichte hervorgerufen werden; über die dabei gewonnenen Ergebnisse soll im folgenden berichtet werden. Zwei Berichte über das Seismometer und einige Versuche sind schon veröffentlicht worden*)**). Die Versuche bestanden in der Registrierung der Bodenerschütterungen, hervorgerufen durch Sprengungen in einem 17 km entfernten Basaltsteinbruch und in der Registrierung von Schallwellen einer Sprengung in Jüterbog.

Ähnliche Versuche mit einem fünfzigtausendfach vergrößernden Horizontalseismometer hat Herr Geheimrat Wiechert schon 1906 auf dem Artillerieschießplatz bei Meppen zur Untersuchung der Bodenerschütterungen durch Schiffsgeschütze angestellt***). Mit demselben Seismometer untersuchte L. Mintrop in seiner Doktordissertation†) die Bodenschwingungen, die von den Groß-Gasmaschinen des Göttinger Elektrizitätswerkes erzeugt werden. Dort befindet sich auch das Diagramm eines künstlichen Erdbebens, hervorgerufen durch den Fall einer 4000 kg schweren Stahlkugel aus 14 m Höhe. Über weitere Fall-

*) E. Wiechert: Untersuchungen der Erdrinde mit dem Seismometer unter Benutzung künstlicher Erdbeben. Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Math.-phys. Kl. 1923.

**) Derselbe: Beobachtungen von Lufterschütterungen in Göttingen bei Sprengungen in Jüterbog. (Seismische Untersuchungen. Erste Mitteilung.) Zeitschr. f. Geophys. 1924/25.

***) Derselbe: Über Erdbebenwellen I, S. 53. Nachr. d. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Math.-phys. Kl. 1907.

†) L. Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Groß-Gasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Dissertation, Göttingen 1911.

versuche derselben Art, in verschiedenen Entfernungen registriert, über Bodenunruhe, hervorgerufen durch Wagen, Eisenbahnen und den Betrieb der Großstadt, über Bodenerschütterungen durch einen Rammbären, Gesteinssprengungen u. dgl. hat Mintrop auf einem Kongreß in Düsseldorf vorgetragen *). Ähnliche Versuche sind auch in dem Bericht Mintrops über die Erdbebenstation in Bochum erwähnt **). Später hat Mintrop ein Vertikalseismometer, als Gegenstück zu diesem Wiechertschen Horizontalseismometer, und zwei Horizontalseismometer so zusammengestellt, daß die Registrierung der drei Komponenten auf einem Film erfolgen kann. Abbildungen dieser Instrumente und der erzielten Registrierungen finden sich außer in den zitierten Abhandlungen noch in Galitzin, Vorlesungen über Seismometrie, S. 205 ff. Mintrop hat dann leicht transportable Vertikalseismometer konstruiert, die von der von Mintrop geleiteten Firma „Seismos", Hannover, für Zwecke der praktischen Geologie des Bergbaues erfolgreich verwendet werden ***).

Seismographen und Seismoskope für besonders schnelle Bodenschwingungen sind von Grunmach †) konstruiert worden. Grunmach hat die Felsschwingungen gemessen, die an der Queis-Talsperre (bei Marklissa in Schlesien) durch den Absturz größerer Wassermassen hervorgerufen werden. Er benutzte dabei zwei Apparate: einen Apparat zur Messung der Maximalwerte der auftretenden Beschleunigungen in drei zueinander senkrechten Richtungen (Dreipendelapparat) und ein Horizontalpendel. Die Beschleunigungen schwankten je nach den Abflußverhältnissen der Wassermassen zwischen 5 und 130 cm/sec², die registrierten Felsschwingungen hatten eine Periode von 0.029 bis 0.0025 Sekunden.

§ 2. Die benutzten Apparate. Das Millionenseismometer steht im Erdbebenhause des Göttinger Geophysikalischen Instituts auf Muschelkalkuntergrund, der durch einen Betonüberzug geebnet ist. Es bedeckt eine Grundfläche von etwa 4 qm, so daß es sinnlos wäre, wie gleich hier erwähnt sein mag, die „Herdentfernung" genauer als auf $\pm$ 1 m angeben zu wollen. Der Apparat hat noch nicht seine endgültige Form, es ist vorgesehen, die Vergrößerung noch zu steigern. Die Masse des Seismographen wird dargestellt durch 16 Betonplatten von je 330 bis 340 kg Gewicht, 1.80 m Länge und in der Mitte etwa 1 m Höhe, die senkrecht parallel nebeneinander stehen. Nach beiden Seiten verjüngen sich die Platten, das eine Ende steht durch Vermittlung eines eisernen Dreifußes auf dem Felsboden, die anderen Seitenenden ruhen zu je acht auf zwei Eisenbahnschienen. Jede der Eisenbahnschienen liegt auf einem Vergrößerungshebel auf, an dem auch die Tragefedern angreifen, die zu jedem Vertikalseismometer ge-

*) L. Mintrop: Über künstliche Erdbeben. Intern. Kongr. f. Bergbau, Hüttenwesen, angew. Mechan. u. prakt. Geologie. Düsseldorf 1910. Ber. d. Abteil. f. prakt. Geologie.

**) Derselbe: Die Erdbebenstation der westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum. „Glück auf", Berg- u. Hüttenmännische Zeitschr., 45. Jahrg., Essen/Ruhr 1909.

***) Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten nach dem seismischen Verfahren. Mitteilungen der Seismos-Gesellschaft. Hannover 1922. Selbstverlag der Seismos.

†) L. Grunmach: Über neue Methoden und Apparate zur Messung von Erderschütterungen kleinster Periode. Phys. Zeitschr. **10**, 853—859 (1909).

hören. Es sind dann, an einem besonderen Gestell befestigt, mehrere weitere Hebel hintereinander geschaltet, die schließlich das Spiegelgehänge bewegen. Außerdem finden sich noch die übliche Dämpfung, verschiedene Arretierschrauben und Astasierfedern. Sämtliche Gelenke sind in der von Wiechert eingeführten Weise in Form von Biegefedern ausgebildet, so daß Reibung nicht auftreten kann.

Lichtschreiber für die photographische Registrierung nach Mintrop waren von der Firma Seismos, Hannover, dem Institut zur Verfügung gestellt worden. Ein solcher Lichtschreiber, ein leicht handlicher Registrierapparat, besteht aus einem lichtdichten Kasten, enthaltend die Vorratstrommel für das photographische Papier und das Uhrwerk für den Transport des Papiers. Zwei außen am Kasten befindliche drehbare Knöpfe gestatten, Uhrwerk und Mitnehmervorrichtung augenblicklich und unabhängig voneinander ein- und auszuschalten. Der Lichtpunkt zur Registrierung wird in der bekannten Weise durch Einfadenglühbirne, Linse und Zylinderlinse erzeugt. Da der Seismograph sehr gute Optik besitzt, ist bei geradem Faden der Glühbirne der Lichtpunkt außerordentlich scharf und gibt Kurven von etwa $^1/_{10}$ mm Dicke.

Von dem 6 cm breiten photographischen Papier stehen für die Registrierung der Bodenerschütterungen 4 cm der Breite zur Verfügung, an jeder Seite wird etwa 1 cm für Zeitmarken in Anspruch genommen. Auf der einen Seite erzeugt eine sinnreiche Vorrichtung des Lichtschreibers in Abständen von $^1/_5$ Sekunde Lichtblitze. Dadurch ist eine scharfe Kontrolle über den regelmäßigen Gang des Uhrwerks gewährleistet. Die Registriergeschwindigkeit betrug je nach den zur Verfügung stehenden Lichtschreibern 1 bis 7 cm/sec, bevorzugt wurden die schnellen Registriergeschwindigkeiten, wenn ein passender Lichtschreiber zur Verfügung stand. Bei tadellosem Gange des Uhrwerks und schneller Registriergeschwindigkeit beträgt die Genauigkeit, mit der die Kurve ausgemessen werden kann, etwa $\pm$ 0.001 Sekunden.

Der Lichtschreiber steht bei der Registrierung unter Zwischenschaltung einer Gummifederung auf einer Holzkonsole, die an der Wand des Erdbebenhauses angebracht ist. Störende Erschütterungen des Seismographen durch das Uhrwerk des Lichtschreibers wurden infolge dieser Vorsichtsmaßregeln nicht beobachtet. Der Beobachter sitzt bei der Registrierung auf einer Plattform, die an Ketten von der Decke herabhängt.

Das Fallwerk, ein eiserner Gerüstturm von 14 m Höhe und 4 Tonnen Tragfähigkeit, befindet sich in 125 m Entfernung vom Seismometer im Institutsgelände. Als Fallkörper wurden gewöhnliche Gewichtstücke benutzt, und zwar Gewichte von 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 und 50 kg. Sie wurden so fallen gelassen, daß sie mit der unteren ebenen Fläche zum Aufschlagen kamen. Ferner wurde eine Walze von 117 kg Gewicht und 48 cm Länge und 23 cm Durchmesser benutzt, die an zwei Zapfen an den Enden in die Höhe gezogen wurde, so daß die Achse stets horizontal blieb. Die Walze kam also mit der Zylinderfläche zum Aufschlagen auf den Boden. Die größte Fallhöhe betrug 11 bis 12 m. Zum Heraufziehen der Fallgewichte diente ein gewöhnlicher Schiffsflaschenzug. Zwischen Flaschenzug und Gewicht befand sich die elektrische Auslösungsvorrichtung, die vom Erdbebenhause aus bedient werden konnte.

Die Aufschlagfläche für die Fallgewichte war im Erdboden in besonderer Weise vorbereitet. In dem mit größeren Kalksteinbrocken durchsetzten Erdboden war eine trichterförmige Grube von 1 m Tiefe ausgehoben. Die Wände wurden mit Kalksteinplatten ausgelegt, und dann der Trichter mit gewaschenem Kies bis zu einer Höhe von 70 cm aufgefüllt, so daß die Gewichte in diesen Kies hineinfielen.

§ 3. Konstantenbestimmungen. Die Eigenperiode T_0 ist bei der jetzigen Form des Seismographen mittels der Astasierfedern in den Grenzen von etwa $^1/_5$ bis $^1/_{30}$ Sekunde veränderlich. Zu Beginn der Registrierung bei der Aufstellung des Seismographen wurde versucht, eine möglichst lange Eigenperiode zu erreichen, $^1/_5$ Sekunde oder noch länger. Bei dieser Regulierung wurden auch die ersten Fallversuche für die vorliegende Arbeit gemacht. Genaue Konstantenbestimmungen von Eigenperiode T_0, äquivalenter Pendellänge L und Dämpfung ε ließen sich hierbei aus verschiedenen Gründen nicht vornehmen. Zum Beispiel war es nicht möglich, das Pendel anzustoßen und dann frei schwingen zu lassen, es blieb dabei an den Hemmschrauben kleben. Es konnte nur die Indikatorlänge J gemessen werden und daraus, unter Zugrundelegung einer durch die Hebelübersetzung fest gegebenen Indikatorvergrößerung von etwa 2 Millionen, die äquivalente Pendellänge und die Eigenperiode berechnet werden. Die Dämpfung war ungefähr aperiodisch. Alle Schwierigkeiten, die beim Arbeiten mit Seismographen großer Indikatorlänge und Neigungsempfindlichkeit auftreten, kamen noch hinzu. Es wurde bei diesen Versuchen eine Indikatorlänge von $J = 10\,000$ bis $20\,000$ m und darüber erreicht, entsprechend einer Eigenperiode von $^1/_7$ bis $^1/_5$ Sekunde und einer Neigungsempfindlichkeit $E = \frac{J}{206\,000}$ von etwa 50 bis 100 mm. Doch sind alle diese Zahlen sehr wenig genau, sie sollen nur eine Anschauung der Größenverhältnisse geben.

Bei den Hauptversuchen wurde aus Gründen, die im nächsten Abschnitt erörtert werden, eine andere Einregulierung, und zwar auf kurze Eigenperiode von etwa $^1/_{25}$ Sekunde, gewählt. Ein kleiner Umbau am Seismographen ermöglichte nunmehr auch genaue Konstantenbestimmungen. Nur die reduzierte Eigenperiode T_0, d. h. die Schwingungszeit des ungedämpften Pendels, mußte auch jetzt noch aus der Schwingungsdauer T^* des gedämpften Pendels berechnet werden, da die Dämpfung nicht ausgeschaltet werden konnte. Zwischen T^* und T_0 besteht die Beziehung*):

$$T_0 = \frac{T^*}{\sqrt{1 + \left(\frac{\log \text{nat}\, \varepsilon}{\pi}\right)^2}}.$$

Gelegentlich einer Reinigung der Dämpfung konnte dieses theoretisch abgeleitete Verhältnis nachgeprüft werden; es wurde eine gute Übereinstimmung mit der Beobachtung gefunden.

Bei jeder Versuchsreihe wurde eine vollständige Konstantenbestimmung durchgeführt. Die Periodenmessungen wurden mit der größten Sorgfalt aus-

*) E. Wiechert: Prinzipien für die Beurteilung der Wirksamkeit von Seismographen. Physikal. Zeitschr. **2**.

geführt, um ein Urteil zu gewinnen, welche Genauigkeit bei der zeitlichen Analyse des Diagramms noch gewährleistet wird. In der Tat zeigen die mittleren Fehler, daß noch mit einer Genauigkeit von 0.001 Sekunden gemessen werden kann.

Tabelle 1 gibt die Zahlen, wie sie bei einer beliebig herausgegriffenen Konstantenbestimmung gewonnen wurden.

Tabelle 1.

Eigenperiode des gedämpften Pendels T^* in sec	Dämpfung $\varepsilon : 1$	Ablenkung für 40 g Belastung a in mm
0.044	3.0	23.0
0.044	3.3	21.5
0.044	3.0	21.1
0.044	3.4	21.0
0.043	2.5	21.8
0.041	3.7	20.9
0.045	2.8	20.0
—	—	20.0
Mittel: 0.0436 ± 0.0005	3.1	21.2 ± 0.35

Die von mir benutzte stationäre Masse beträgt unter Berücksichtigung aller Umstände etwas über 1500 kg; wegen Fehlens verschiedener Hilfseinrichtungen konnten noch nicht sämtliche Platten in den Seismographen eingehängt werden. Bei einem Dämpfungsverhältnis von $\varepsilon = 3.1$ ist $\frac{T^*}{T_0} = 1.062$, es folgt für die reduzierte Eigenperiode $T_0 = 0.0410 \pm 0.0005$ Sekunden. Weiter ergibt sich für die äquivalente Pendellänge der Wert $L = 0.0420 \pm 0.0010$ cm, für die Indikatorlänge der Wert $J = 802 \pm 13$ m und für die Indikatorvergrößerung der Wert $V = (1.91 \pm 0.06) . 10^6 = 1.91 . 10^6 \pm 3.1$ Proz. Bei T_0 und L ist die vierte Dezimale natürlich nur Rechnungsgröße. — In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Konstantenbestimmungen zusammengestellt.

Tabelle 2.

Dämpfung $\varepsilon : 1$	Reduzierte Eigenperiode T_0 in sec	Äquivalente Pendellänge L in cm	Indikatorlänge J in m	Indikatorvergrößerung $V/10^6$
3.1	0.0438 ± 0.0005	0.0480 ± 0.0010	829 ± 8	1.73 ± 0.05
3.1	0.0400 ± 0.0006	0.0400 ± 0.0013	803 ± 7	2.01 ± 0.07
3.1	0.0410 ± 0.0005	0.0420 ± 0.0010	802 ± 13	1.91 ± 0.06
3.2	0.0367 ± 0.0006	0.0342 ± 0.0011	810 ± 15	2.37 ± 0.09
2.9	0.0382 ± 0.0007	0.0367 ± 0.0013	821 ± 15	2.25 ± 0.09
2.1	0.0416 ± 0.0006	0.0433 ± 0.0012	776 ± 7	1.79 ± 0.05

Trägt man, wie in Fig. 1, Eigenperiode T_0 und Indikatorvergrößerung V in ein Koordinatensystem ein, so ergibt sich, daß mit wachsender Periode die Indikatorvergrößerung sinkt. Meines Wissens ist auf diesen Zusammenhang bisher noch nicht hingewiesen worden. Die Abhängigkeit dürfte ihren Grund in der Konstruktion der Gelenke haben, bei deren Bewegung die wirksamen Hebel sich ändern. Wenn dieser Grund richtig ist, so muß diese Erscheinung auch bei anderen Seismographen mit ähnlicher Konstruktion zu beobachten

sein. In der Tat konnte ich einen solchen Zusammenhang angedeutet finden bei Wiecherts 1200-kg-Horizontalpendel. Nach dem Konstantenbuch des Göttinger Geophysikalischen Instituts zeigt sich dieser Zusammenhang bei einer Meßreihe von sieben aufeinanderfolgenden Tagen, besonders deutlich in der E–W-Komponente, weniger deutlich in der N–S-Komponente.

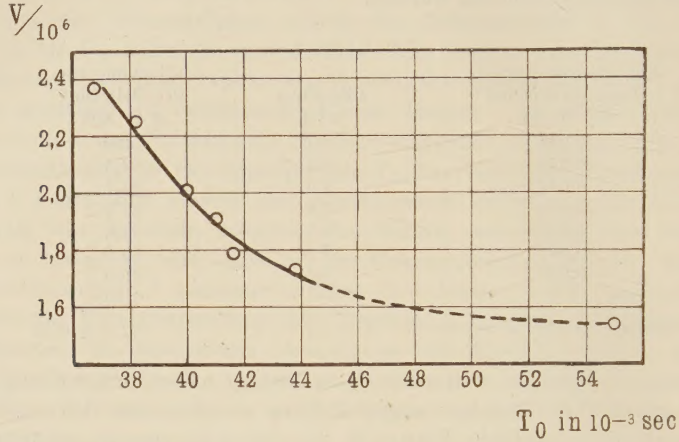

Fig. 1. Zusammenhang von Eigenperiode und Indikatorvergrößerung.

§ 4. Bodenunruhe. Eine Darstellung der Bodenunruhe bei dem neuen Seismographen ist nicht beabsichtigt, die Bodenunruhe soll nur so weit besprochen werden, als sie sich bei den Fallversuchen störend bemerkbar macht.

Die ersten Fallversuche wurden bei möglichst großer Eigenperiode, etwa $^1/_5$ bis $^1/_8$ Sekunde vorgenommen: „Weiche Regulierung“. Wie schon Herr Geheimrat Wiechert in seinen oben zitierten Abhandlungen ausführt, zeigt dann das Seismometer keine Bodenruhe mehr, stets ist der Lichtpunkt in mehr oder weniger starker Zitterung begriffen. Es zeigte sich, daß die Bodenunruhe in den späten Abendstunden und in tiefer Nacht sehr viel kleiner wurde, die Tagesunruhe also als Betriebsunruhe der 2 bis 4 km entfernten Stadt anzusprechen ist, doch blieb stets auch nachts noch ein Rest von Unruhe vorhanden, so daß feinere Einzelheiten bei den Fallversuchen verloren gingen. Auch die Jahreszeit scheint von Einfluß zu sein, in den Sommermonaten bis spät in den Herbst hinein ist die Bodenunruhe kleiner als sonst.

Die bei der Bodenunruhe auftretenden Perioden wechseln sehr stark. Besonders auffallend ist eine Periode von etwa $^1/_5$ Sekunde, doch wurden mitunter auch Perioden von $^1/_{10}$ Sekunde gemessen. Diesen großen Schwingungen sind kleinere überlagert von ungefähr $^1/_{50}$- bis $^1/_{20}$-Sekunden-Periode. Die ersten Fallversuche, die nach einigen Vorversuchen in tiefer Nacht vorgenommen wurden, ergaben, daß durch die fallenden Gewichte fast ausschließlich ganz kleine Perioden von schätzungsweise $^1/_{50}$ Sekunde ausgelöst wurden. Die noch vorhandene Bodenunruhe ließ nicht erkennen, ob auch größere Perioden auftraten, jedenfalls müßte ihre Amplitude kleiner sein als die Amplitude der Bodenunruhe.

Diese Verhältnisse ergaben die Möglichkeit, die schädliche Bodenunruhe aus dem Seismometer „herauszuregulieren“. Es bedeute T_0 die reduzierte Eigenperiode, V die Indikatorvergrößerung, T die Periode der registrierten Bodenbewegung und $\mathfrak{V}$ die wirkliche Vergrößerung, mit der diese Bodenbewegung von der Periode T aufgezeichnet wird. Beträgt die Periode der Bodenbewegung T ein Vielfaches der Eigenperiode T_0 des Seismometers, so kann angenähert gesetzt werden*):

$$\mathfrak{V} = V \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^2.$$

Bei der weichen Regulierung betrug die Eigenperiode T_0 etwa $^1/_5$ Sekunde, die Periode T der besonders schädlichen Bodenunruhe ebenfalls etwa $^1/_5$ Sekunde und die Amplitude dieser Bewegung etwa 5 bis 10 mm, gemessen von der Ruhelage aus, nachts etwas kleiner. Das Verhältnis $\frac{T_0}{T}$ beträgt 1, es ist also annähernd $\mathfrak{V} = V$. Wählen wir nun eine Einregulierung des Seismographen auf

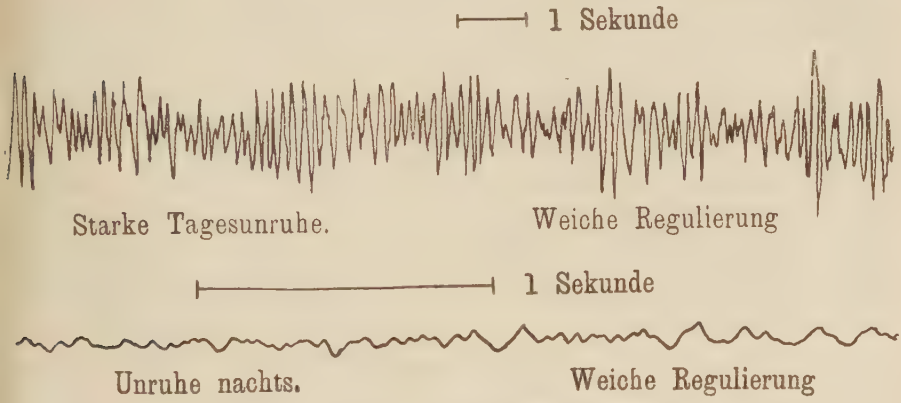

Fig. 2. Bodenunruhe. Natürliche Größe.

eine Eigenperiode T_0 von etwa $^1{}_{25}$ Sekunde, „harte Regulierung“, so beträgt das Verhältnis $\frac{T_0}{T}$ jetzt $^1{}_5$, die wirkliche Vergrößerung für die Bodenbewegung der Periode $T = ^1/_5$ Sekunde sinkt auf den 25. Teil. Die Amplitude von 5 bis 10 mm wird also auch auf den 25. Teil verkleinert, also auf etwa 0.2 bis 0.4 mm.

In der Tat zeigte sich, als nach einem kleinen Umbau am Seismographen die Eigenperiode T_0 auf $^1{}_{25}$ Sekunde gebracht werden konnte, daß die Bodenunruhe auch am Tage nicht mehr störend wirkte. Unterstützend trat hinzu, daß nun eine größere Registriergeschwindigkeit von etwa 5 bis 7 cm sec gewählt werden konnte. Der Lichtpunkt beschrieb nun eine gerade Linie, in der nur hin und wieder kleine Schwingungen von etwa $^1{}_{60}$-Sekunde-Periode und einer Amplitude von höchstens $^1{}'_4$ mm auftraten. Durch Erschütterungen im Uhrwerk des Lichtschreibers können diese kleinen Schwingungen nicht hervorgerufen sein.

*) E. Wiechert: Theorie der automatischen Seismographen. S. 79.

Solche Lichtschreiberstörungen habe ich nur einmal beobachtet, als ich einen Lichtschreiber von normal 1.5 cm/sec Laufgeschwindigkeit auf 4 bis 5 cm sec brachte und ihn dadurch etwas überanstrengte. Aber die dadurch hervorgerufenen Schwingungen waren sehr viel kleinerer Periode, sie machten sich nur in einer Verbreiterung des Lichtpunktes bemerkbar und konnten nur mit einer scharfen Lupe aufgelöst werden. Bei den Hauptversuchen stand ein guter Lichtschreiber von normal 5 bis 7 cm/sec Laufgeschwindigkeit zur Verfügung.

§ 5. Drei Sprengversuche und Bestimmung der Laufgeschwindigkeit der Wellen. Zu den kleinen Sprengversuchen wurden Feuerwerkskörper, sogenannte Kanonenschläge benutzt; es sind dies würfelförmige Pappkartons von etwa 10 cm Kantenlänge, allseitig mit kräftigem Bindfaden umwickelt und dann geleimt. Die Füllung besteht nach den Angaben des Herstellers aus 110 g Schwarzpulver. Für die Sprengversuche wurde elektrische Zündung gewählt, die vom Erdbebenhause aus unter Beobachtung geeigneter Vorsichtsmaßregeln bedient werden konnte. Als Sprengstelle wurde der auch bei den Fallversuchen benutzte, mit Sand gefüllte Trichter in 125 m Entfernung vom Seismometer gewählt. Beim ersten Sprengversuch wurde der Kanonenschlag etwa 0.70 m tief in den Kies eingegraben, beim zweiten Versuch auf die Oberfläche der Kiesfüllung aufgelegt, und schließlich beim dritten Versuch fand die Sprengung 2 m über dem Erdboden in der Luft statt. Zwei Herren, die als Praktikanten im Institut arbeiten, beobachteten den Verlauf der Sprengungen. Danach wurde bei der Sprengung des 0.70 m tief eingegrabenen Kanonenschlages eine Sandwolke etwa 5 m hoch geschleudert. Dann fielen die Sandkörnchen gleich einem Sandregen wieder herab, die Hauptmassen wieder in den Trichter hinein, nur wenig Sand fiel weiter als 2 m von der Sprengstelle entfernt nieder. Zusammengeballte Sandmassen, die bei ihrem Auftreffen auf den Erdboden ein zweites „Erdbeben“ hätten verursachen können, wurden nicht beobachtet. Der ausgeworfene Trichter hatte einen Durchmesser von etwa 60 cm und eine Tiefe von ebenfalls 60 cm. Die Schallwirkung war sehr schwach, der Ton des Knalles ganz dumpf. Im Erdbebenhause waren von den vier Türen, die man passieren muß, um in den Instrumentenraum zu gelangen, die drei inneren geöffnet, nur die äußere war zum Schutz gegen Tageslicht und Luftzug geschlossen. Der Schall dieser Sprengung war im Erdbebenhause aber nicht zu hören. Beim zweiten Versuch, bei dem der Kanonenschlag auf dem Erdboden aufliegend zur Explosion kam, ergab sich kein Aufspritzen des Sandes; der Knall war heller. Im Erdbebenhause beobachtete ich scharf den Lichtpunkt, der die Registrierung bewirkt. Es erfolgte zunächst ein kleiner Ausschlag, entsprechend der Ankunft der seismischen Wellen. Kurz darauf wurde ein zweiter größerer Ausschlag bemerkt und genau gleichzeitig der Knall der Explosion im Erdbebenhause gehört, etwas dumpf. Infolgedessen kann bei dem Bebenbild der zweite größere Ausschlag mit der Ankunft der Schallwellen am Erdbebenhause gleichgesetzt werden. Die Bestimmung der Laufgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen geschieht nun folgendermaßen:

An dem Tage, an dem die Versuche vorgenommen wurden, herrschte vollkommene Windstille, so daß der Wind auf die Schallgeschwindigkeit keinen

Einfluß ausüben konnte. Die Lufttemperatur betrug 10° C. Für die Schallgeschwindigkeit ergibt sich daraus der Wert 338 m sec. Den 125 m langen Weg von der Sprengstelle bis zum Erdbebenhause legen die Schallwellen also zurück in 0.370 Sekunden. Die Differenz der beiden Einsätze des Seismogramms, von denen der erste der Ankunft der longitudinalen seismischen Wellen und der zweite der Ankunft der Schallwellen entspricht, beträgt 0.296 Sekunden, und für die Laufzeit der longitudinalen Wellen erhält man 0.370 — 0.296 = 0.074 Sekunden. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen in den obersten Muschelkalkschichten des Göttinger Hainberges berechnet sich demnach zu 1690 m/sec.

Beim dritten Sprengversuch, bei dem der Kanonenschlag 2 m über dem Erdboden zur Explosion gebracht wurde, haben wir ein ähnliches Ergebnis. Der

Fig. 3. Sprengungen (Kanonenschläge), 125 m vom Millionenseismometer entfernt. — Harte Regulierung. Natürliche Größe.

erste Einsatz, hervorgerufen durch die Ankunft der longitudinalen seismischen Wellen, ist diesmal entsprechend kleiner, der zweite Einsatz entspricht wieder der Ankunft der Schallwellen. Die Differenz der beiden Einsätze ist 0.289 Sekunden. Diese Differenz muß kleiner sein als beim vorigen Versuch, da der Schall erst 2 m von dem Kanonenschlag zur Erde in Luft zurücklegen mußte, bevor die seismischen Wellen erzeugt wurden. Es handelt sich bei dem ersten Einsatz um Luft-Erd-Wechselwellen. Diese eben erwähnten 2 m durchläuft der Schall in 0.006 Sekunden. Die Laufzeit der longitudinalen seismischen Wellen für die 125 m lange Strecke beträgt demnach 0.370 — (0.289 + 0.006) = 0.075 Sekunden, und die Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ergibt 1670 m/sec. Die Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden letzten Versuche ist sehr gut, die Differenz der Laufzeit von 0.001 Sekunden liegt durchaus innerhalb der Genauigkeit, mit der das Seismogramm ausgemessen werden kann. Weitere

Laufzeitmessungen wurden bei den Fallversuchen nicht vorgenommen, es fehlten die Vorrichtungen, die es gestatteten, den Augenblick des Aufprallens des Fallgewichts mit der erforderlichen Genauigkeit auf das Registrierpapier zu übertragen.

Ein Vergleich der drei Sprengversuche untereinander und mit den Fallversuchen gibt Aufschluß über die Wirkung der Sprengung in Abhängigkeit von der Lage des Sprengstoffes. Das Bebenbild der Sprengversuche mit oberirdischer Lagerung, einmal 2 m über dem Erdboden, das andere Mal auf dem Erdboden aufliegend, ist nach der Größe der Amplituden vergleichbar mit Fallversuchen von 10 kg in etwa $^1/_2$ m bzw. 1 bis 2 m Fallhöhe. Ganz anders beim dritten Versuch, bei welchem der Kanonenschlag 0.70 m tief eingegraben war. In der ersten Sekunde gehen die Ausschläge nach beiden Seiten über das photographische Papier hinaus, ähnlich wie bei den größeren Fallversuchen, in der zweiten und dritten Sekunde sind die Amplituden annähernd doppelt so groß wie bei dem größten Fallversuch: 117 kg Fallgewicht und 11 m Fallhöhe. Bei derselben Pulvermenge wird beim Eingraben unter sonst gleichen Umständen die Einwirkung auf den Seismographen schätzungsweise 50- bis 100 mal größer sein als bei oberflächlicher Lage des Sprengstoffes. Dieses Ergebnis erläutert den Mißerfolg der seismischen Beobachtung bei größeren, meteorologischen Zwecken angepaßten Sprengungen in Holland im Herbst 1922, Jüterbog am 3. Mai 1923 und Zentralfrankreich Mai 1924. Bei diesen Sprengungen wurden 1000 bis 10 000 kg oberflächlich gelagerten Sprengstoffes zur Explosion gebracht. Infolge der oberflächlichen Lage wurde nur sehr wenig Energie in Gestalt seismischer Wellen fortgeleitet, so daß in Göttingen seismische Wellen nicht mit Sicherheit zu beobachten waren.

O. Hecker*) hat 1897 und 1898 größere Sprengungen von 1500 kg brisanten Sprengstoffes, oberirdisch gelagert, mit Seismographen geringer Empfindlichkeit, etwa vier- bis siebenfacher Vergrößerung, registriert. Diese Registrierungen beziehen sich nur auf die langsam sich fortpflanzenden Oberflächenwellen. Der longitudinale erste Einsatz ist nur in einem Falle durch Beobachtung eines Quecksilberhorizontes festgestellt und eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 1430 m sec gefunden worden. Der Untergrund bestand aus Sandboden, der mit Grundwasser durchsetzt war.

*) O. Hecker: Ergebnisse der Messung von Bodenbewegung bei einer Sprengung. Beiträge z. Geophysik, Bd. IV u. VI, 1900 u. 1904.

Bodenerschütterungen durch fallende Gewichte*).

(Göttinger seismische Untersuchungen.)

Von **F. Hubert** in Göttingen. — (Mit fünf Abbildungen.)

Es werden Fallversuche beschrieben, die im Gebiet des Göttinger geophysikalischen Institutes vorgenommen wurden. Die Diagramme, sämtlich mit dem Wiechertschen Zweimillionenseismometer in 125 m Entfernung aufgenommen, zeigen neun verschiedene Einsätze und gestatten, die Abhängigkeit der Amplituden von der Fallhöhe und von der Beschaffenheit des Erdbodens an der Aufschlagstelle, und die Abhängigkeit der Periode des ersten Einsatzes von der Impulsfläche zu bestimmen. Die einzelnen Diagramme können nach Art der identischen Seismogramme bei Fernbeben Schwingung für Schwingung aufeinander bezogen werden.

a) Fallversuche mit größeren Fallgewichten und größeren Fallhöhen. Sämtliche Versuche wurden in der Weise ausgeführt, daß nach der Vorbereitung des Versuches der Lichtpunkt des Wiechertschen Seismographen beobachtet wurde; bei Abwesenheit von Störungen durch Wagenverkehr od. dgl. genügte die Schließung eines elektrischen Kontaktes, um das Gewicht zum Fallen zu bringen. Zu den in diesem Abschnitt beschriebenen Fallversuchen wurden Gewichte von 20, 50 und 117 kg benutzt, die Fallhöhen betrugen 1 bis 11 m. Anfangs wurde jeder Versuch mit demselben Gewicht und gleicher Fallhöhe dreimal wiederholt, später erwies es sich als ausreichend, die Versuchsreihen in der Weise auszuführen, daß in einer Versuchsreihe dasselbe Gewicht und um je 1 m abnehmende Fallhöhen von 11 m bis herab zu 1 m benutzt wurden. Solche Versuchsreihen ließen sich an einem Nachmittag oder in einer Nacht durchführen. Bei jedem Diagramm wurde ausgemessen die Einsatzzeit der einzelnen Einsätze, ihre Periode, Amplitude und maximale Beschleunigung. Bei dem ersten Einsatz und zum Teil auch noch bei den folgenden Einsätzen waren die Schwingungen öfters so groß, daß der Lichtpunkt auf beiden Seiten das Papier verließ, so daß dann Amplitudenmessungen und manchmal sogar Periodenmessungen nicht mehr auszuführen waren.

Die Einsatzzeiten sind so gewonnen, daß die Zeit vom ersten Einsatz bis zum n-ten auf dem Diagramm ausgemessen und zu der so erhaltenen Zeit die Laufzeit der Wellen, die den ersten Einsatz hervorrufen, hinzuaddiert wurde. Diese Laufzeit hatte sich bei den Sprengversuchen zu 0.074 Sekunden ergeben, S. 141 dieser Zeitschrift. Das Ausmessen der Diagramme erfolgte mit großer Sorgfalt, eine Wiederholung der Messungen führte zu demselben Ergebnis. Betrachtet man einen Einsatz in den Diagrammen, anfangend mit kleinen Fallenergien und fortschreitend zu immer größeren, so findet man zunächst ein schwaches Auftauchen des Einsatzes, während die Kurve vor dem Einsatz noch

*) Eine Beschreibung der instrumentellen Einrichtungen habe ich in einer Arbeit gegeben, die in der Zeitschr. f. Geophys. 1925, Heft 4 (S. 134—143) erschienen ist. Diese frühere Arbeit stellt den ersten Teil, die vorliegende Arbeit den zweiten Teil einer Göttinger Doktordissertation dar.

verhältnismäßig ruhig ist. Mit dem Größerwerden der Fallenergie wird der Einsatz dann schärfer und allmählich füllt sich auch die Kurve vor dem Einsatz mit Schwingungen an, sodaß bei ganz großer Fallenergie der Einsatz dem ungeübten Auge nur noch schwer zu erkennen ist, häufig nur daran, daß der Lichtpunkt sich auf dem Papier plötzlich sehr schnell bewegt und dann kaum einen Eindruck hinterlassen hat. Falls Zweifel auftauchten, welcher von verschiedenen, nahe beieinander gelegenen Punkten der Einsatz sein sollte, wurden sämtliche in Frage kommenden Punkte auf allen Diagrammen durchgemessen und derjenige Punkt als Einsatz gewählt, für welchen die Einsatzzeit auf allen Diagrammen innerhalb der Fehlergrenze konstant war. Auf diese Weise war es möglich, das Vorliegen eines Einsatzes mit großer Sicherheit zu bestimmen. Es wurden folgende Einsätze gefunden mit den Einsatzzeiten:

i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9
0.074	0.179	0.296	0.445	0.611	0.90	1.88	2.5	3.2 sec

Die späteren Einsätze, etwa von i_5 ab, fehlen auf den Diagrammen mit kleineren Fallhöhen, und von i_7 ab ist auch bei größeren Fallhöhen nur ein Auftauchen von Wellen zu bemerken. Doch ist die Existenz dieser Einsätze durch die dem Einsatz vorangehende ruhige Kurve ganz sichergestellt.

Die Einsatzzeiten erweisen sich als vollständig unabhängig von den benutzten verschiedenen Fallgewichten und Fallhöhen, sie sind auch bei dem Sprengversuch dieselben. Auch eine Störung durch Eigenschwingungen des Seismographen oder Teile desselben ist vollständig ausgeschlossen, da dieselben Einsatzzeiten bei ganz verschiedenartigen Einregulierungen des Seismographen gewonnen wurden: Bei weicher Einregulierung auf etwa $^1/_5$ Sekunde Eigenperiode haben wir dieselben Einsatzzeiten wie bei harter Einregulierung auf etwa $^1/_{25}$ Sekunde Eigenperiode.

Die Konstanz der Einsatzzeiten und ihre Unabhängigkeit von allen äußeren Einflüssen ist ein wichtiges Ergebnis. Es zeigt, daß Reflexionen seismischer Wellen an mehr oder minder tief gelegenen Unstetigkeitsflächen auftreten, und daß Schichten in Schwingungen geraten. Die Übereinstimmung der Diagramme geht sogar so weit, daß die einzelnen Diagramme unabhängig von Fallhöhe, Fallgewicht und Seismometerregulierung Schwingung für Schwingung und Zacke für Zacke aufeinander bezogen werden können; nur die Amplituden wechseln in ihrer Größe, und die Übereinstimmung tritt daher besonders deutlich hervor, wenn man die Diagramme in der Reihenfolge allmählicher Zunahme der Fallenergien betrachtet.

Es wird hier angenommen, daß der erste Einsatz i_1 mit 0.074 Sekunden Laufzeit der direkt gelaufenen Longitudinalwelle entspricht. Es braucht dies nicht der Fall zu sein, da der Einsatz auch Wellen entsprechen kann, die in einer tieferen Schicht mit größerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit gelaufen sind.

Der geologische Aufbau des Hainberges bei Göttingen, auf welchem die Versuche ausgeführt wurden, bietet genügend Anhaltspunkte zur Erklärung dieser Einsätze, sodaß die vermutlich zu erwartenden reflektierenden Unstetigkeitsflächen den einzelnen Einsätzen zugeordnet werden können. Die genaue Lagerung der Schichten des Hainberges an der Versuchs-

stelle ist leider nicht bekannt, doch haben wir folgendes zu erwarten: An der Oberfläche zutage tretend Muschelkalk, darunter Buntsandstein, dann in noch größeren Tiefen Zechstein mit Einlagerungen von jüngerem und älterem Stein-

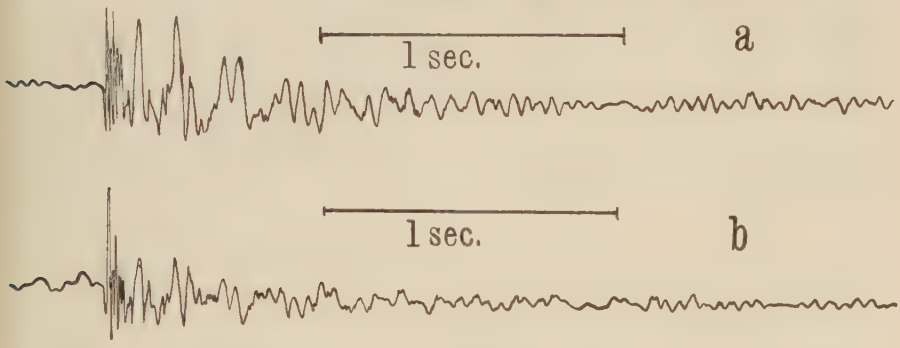

Fig. 1. Aus Versuchsreihe 1. Fallgewicht: 20 kg; Fallhöhe: a) 12 m; b) 3 m. Seismometer: Weiche Regulierung.

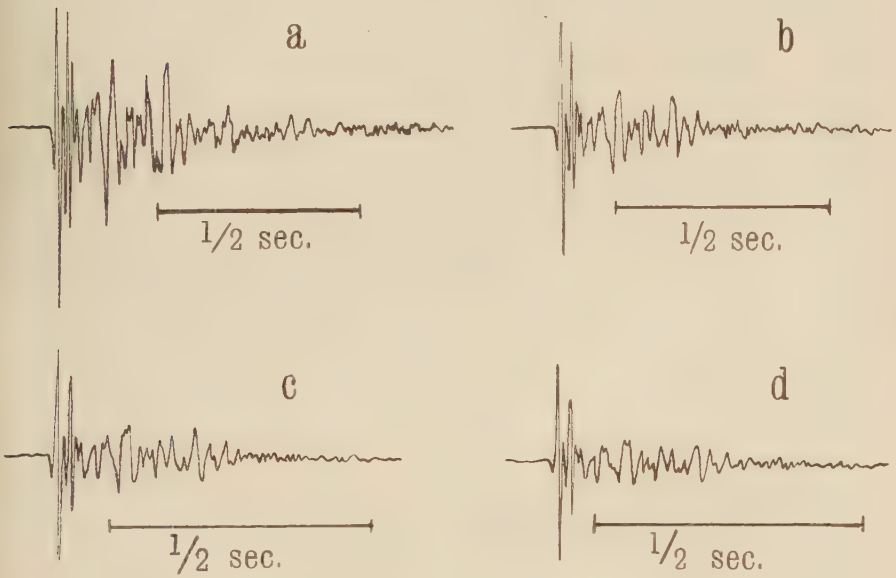

Fig. 2. Aus Versuchsreihe 4. Fallgewicht: 20 kg; Fallhöhe: a) $9^1/_4$ m; b) $3^1/_4$ m; c) $2^1/_4$ m; d) $1^1/_4$ m. Seismometer: Harte Regulierung.

salz. Diese Schichten liegen auf dem abgetragenen variscischen Grundgebirge auf. Die einzelnen Schichten sind noch weiter unterteilt, in dem mächtigen Muschelkalk können wir Schichten aus dem oberen, mittleren und unteren Muschelkalk erwarten und, je nach der Beschaffenheit der Schichten, auch reflektierende Unstetigkeitsflächen. Im Buntsandstein besteht die obere Schicht aus Röt, also

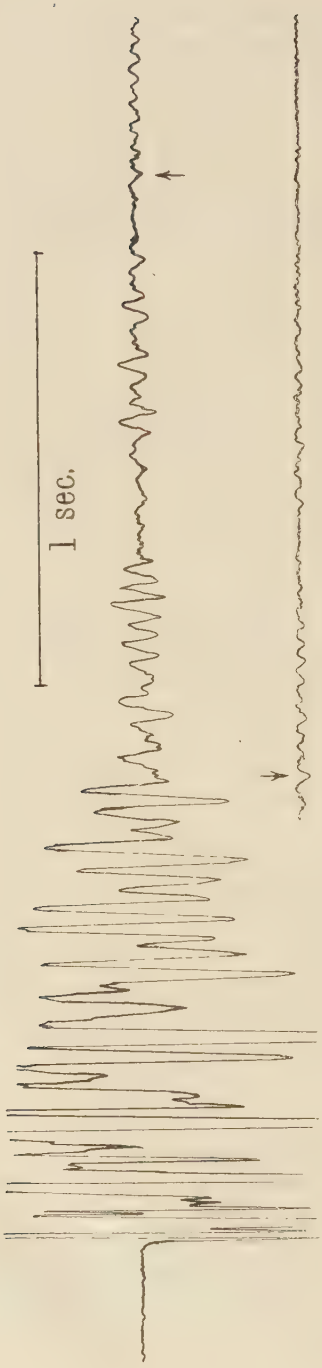

Fig. 3. Aus Versuchsreihe 6. Sprengung: Kanonenschlag mit 110 g Schwarzpulver 0.70 m tief im Sande. Seismometer: Harte Regulierung.

tonigem Material, welches an anderen, aufgeschlossenen Stellen eine Mächtigkeit von etwa 100 m aufweist. Darauf folgt weiter nach unten der Bausandstein.

Die reflektierende Salzschicht können wir nach den geologischen Aufschlüssen der näheren und weiteren Umgebung in etwa 800 bis 900 m Tiefe erwarten. Sollte sie im Untergrund der Versuchsstelle fehlen, so würden an ihre Stelle andere Schichten des Zechsteins treten, die für die Seismik dieselbe Wirkung haben dürften. Die Salzschicht würde durch die besondere elastische Beschaffenheit ihres Materials, d. h. Verschiedenheit der elastischen Konstanten der Salzschicht und des darüberliegenden Deckgebirges, eine besonders starke Reflexion erwarten lassen. Nehmen wir an, daß der Einsatz i_5, Laufzeit 0.611 Sekunden, der sich auf den Diagrammen mit 20 kg Fallgewicht besonders deutlich infolge der vorher schon wieder eingetretenen Ruhe hervorhebt, der Reflexion an der Salzschicht entspricht, so erhalten wir für die seismischen Wellen eine Laufgeschwindigkeit von etwa 3 km/sec, ein Wert, der sehr wohl möglich ist. Unter Zugrundelegung dieses Wertes erhalten wir für die Tiefe der reflektierenden Schichten, welche die einzelnen Einsätze hervorrufen:

Einsatz	Tiefe der refl. Schicht in km
i_3	etwa 0.4
i_4	„ 0.6
i_5	„ 0.8—0.9
i_6	„ 1.3
i_7	„ 3
i_8	„ 4
i_9	„ 5

i_7 würde vielleicht der Oberfläche des variscischen Grundgebirges entsprechen, i_2 einer Schicht, die in den oberen Teilen des Muschelkalkes zu suchen wäre. Natürlich erheben diese Zahlen keinerlei Anspruch auf irgendwelche Genauigkeit, sie sollen nur eine Anschauung von der Art und Weise einer möglichen Verteilung geben.

Die Annahme, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen konstant etwa 3 km/sec sei, ist sicher nicht richtig, es muß Feststellung der Größenordnung genügen. Es ist auch nicht ausgeschlossen, daß der eine oder andere Einsatz von transversalen Wellen herrührt. Eine endgültige Entscheidung in dieser und allen anderen noch offen gelassenen, äußerst interessanten und wichtigen Fragen kann erst gegeben werden durch Veränderung der Entfernung vom Seismographen zur Aufschlagstelle der Fallgewichte und Aufstellung einer Laufzeitkurve. Doch kann schon jetzt gesagt werden, daß mit ganz geringen Hilfsmitteln, 110 g Schwarzpulver zu Sprengzwecken oder Fallgewichte von 117 kg bei Fallhöhen von 11 m, die nachweisbaren seismischen Wellen in Tiefen von mehreren Kilometern eingedrungen sind, also in Tiefen, die durch Bohrlöcher oder gar Schächte nicht im entferntesten erreicht sind.

Die folgenden Tabellen enthalten die Auswertungsergebnisse der einzelnen Versuche; sie sind nach den einzelnen Versuchsreihen zusammengestellt. Der erste Einsatz i_1 ist nicht mit aufgenommen, da bei fast sämtlichen Versuchen Perioden- und Amplitudenmessungen wegen der Größe der Ausschläge nicht möglich waren; im nächsten Abschnitt werden kleinere Versuche für den ersten Einsatz i_1 besprochen werden. Für die einzelnen Einsätze ist der Mittelwert der Einsatzzeiten und der Mittelwert der Periode der Bodenbewegung bei jeder Versuchsreihe gebildet worden, eine Abhängigkeit der Einzelwerte von der Fallhöhe war nicht zu erkennen.

Die Versuche der Versuchsreihen 1, 2 und 3 wurden bei weicher Regulierung des Seismographen in tiefer Nacht vorgenommen. Die Eigenperiode des Seismometers betrug ungefähr $^1/_5$ Sekunde, die Indikatorvergrößerung V dürfte zwischen 1.5 und 2 Millionen liegen, höchstwahrscheinlich näher bei 1.5 Millionen. Infolgedessen sind bei den Amplitudenmessungen nur die Ausschläge des Lichtpunktes auf dem Diagramm in Millimetern wiedergegeben; Amplitude bedeutet Ausschlag von der Ruhelinie aus.

Bei den Versuchsreihen 4 bis 6 besaß das Seismometer harte Regulierung. Angegeben ist bei jeder Versuchsreihe die Eigenperiode T_0 und die Indikatorvergrößerung V. Die weiteren Konstanten sind aus der Tabelle 2, S. 9, zu ersehen. Die angegebenen Amplituden bedeuten hier Bodenbewegung, gemessen in $\mu\mu$ (10^{-6} mm), die maximale Beschleunigung der Bodenbewegung ist in Milligal gemessen.

Tabelle 3.

Versuchsreihe 1. Fallgewicht 20 kg. Seismometer: Weiche Regulierung. Die für die verschiedenen Fallhöhen mitgeteilten Amplituden sind Mittelwerte aus je drei Versuchen.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5
Einsatzzeit in Sekunden	0.178 ± 0.0005	0.296 ± 0.0006	0.446 ± 0.0007	0.62
Periode der Bodenbewegung in Sekunden	0.04	0.051	0.048	0.047
Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern			
12	7.2	8.3	3.7	3.4
9	6.5	8.4	3.6	3.3
6	6.0	6.7	3.1	2.7
3	4.6	5.5	2.4	1.9

Versuchsreihe 2. Fallgewicht 50 kg. Seismometer: Weiche Regulierung.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	
Einsatzzeit in Sek.	0.179 ± 0.0006	0.296 ± 0.0008	0.445 ± 0.0005	0.611 ± 0.001	0.908 ± 0.0006	1.86	(auftauchen)
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	0.04	0.053	0.047	0.045	0.051	0.044	

Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern					
11	?	?	?	6.6	5.0	2.0
10	?	?	11.6	6.9	5.2	2.0
9	?	?	10.0	7.0	5.5	2.0
8	?	?	?	6.2	5.0	1.8
7	?	?	9.2	6.0	4.6	1.8
6	?	?	8.5	6.3	4.0	1.7
5	11.5	13.2	7.7	5.6	3.5	1.1
4	?	?	?	5.0	3.5	1.4
3	9.0	10.3	6.1	4.0	2.5	1.0
2	7.5	9.0	4.6	3.5	2.2	1.0
1	4.9	5.4	2.5	1.8	1.2	—

Versuchsreihe 3. Fallgewicht: Walze 117 kg. Seismometer: Weiche Regulierung. Die für die verschiedenen Fallhöhen mitgeteilten Amplituden sind Mittelwerte aus je drei Versuchen.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7	i_8	i_9
Einsatzzeit in Sek.	0.180 ± 0.0006	0.297 ± 0.0005	0.445 ± 0.001	0.612 ± 0.0008	0.91	1.88	nicht zu erkennen	3.2
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	?	0.05?	0.046	0.043	0.053	0.046		0.046

Fallhöhe in Metern	Amplituden des Lichtpunktes in Millimetern							
10	?	?	?	8.6	6.8	2.6	—	0.5
4	?	?	?	7.0	5.0	1.9	—	—
2	?	?	9.0	5.2	3.0	1.4	—	—

Versuchsreihe 4. Fallgewicht 20 kg. Seismometer: Harte Regulierung. Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.0400$ sec; $V = 2.01 \cdot 10^6$.

Einsatz	i_2	i_3	i_4	i_5
Einsatzzeit in Sek.	0.178 ± 0.0006	0.296 ± 0.0008	0.443 ± 0.0008	0.62
Periode d. Bodenbewegung in Sek.	0.037	0.040	0.045	0.044

Fallhöhe in Metern	Wahre Bodenbewegung							
	Amplituden a in $\mu\mu$.				Maximale Beschleunigung b in Milligal			
	a	b	a	b	a	b	a	b
$11^1/_4$	3.9	11.4	2.0	5.0	1.0	2.0	0.5	1.0
$10^1/_4$	3.7	10.7	2.0	5.0	1.5	3.0	0.7	1.4
$9^1/_4$	3.6	10.4	2.4	6.0	1.4	2.8	0.9	1.9
$8^1/_4$	3.5	10.2	2.2	5.5	1.4	2.8	0.7	1.4
$7^1/_4$	3.1	9.0	1.8	4.5	1.0	2.0	0.6	1.2
$6^1/_4$	3.0	8.7	1.8	4.5	1.0	2.0	0.6	1.2
$5^1/_4$	2.4	7.0	1.6	4.0	0.9	1.7	—	—
$4^1/_4$	2.3	6.7	1.4	3.4	0.7	1.3	—	—
$3^1/_4$	1.9	5.5	1.1	2.6	0.6	1.1	—	—
$2^1/_4$	1.5	4.4	0.9	2.1	0.4	0.7	—	—
$1^1/_4$	1.1	3.2	0.7	1.6	—	—	—	—

Versuchsreihe 5. Fallgewicht 50 kg. Seismometer: Harte Regulierung. Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.042$ sec; $V = 1.79 \cdot 10^6$. Für diese Versuchsreihe stand nur ein langsam laufender Lichtschreiber zur Verfügung. Infolgedessen sind nur Amplitudenmessungen möglich. Einsatzzeiten und Perioden der Bodenbewegung von derselben Größenordnung wie bei den übrigen Versuchen.

Einsatz	i_2		i_3		i_4		i_5		i_6	
	Wahre Bodenbewegung									
Fallhöhe in Metern	Amplituden a in $\mu\mu$.				Maximale Beschleunigung b in Milligal					
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
11	?	?	?	?	4.6	8.3	2.9	6.6	1.2	2.7
10	?	?	?	?	4.6	8.3	2.9	6.6	1.4	3.2
9	?	?	?	?	4.5	8.2	2.9	6.6	1.1	2.5
8	?	?	?	?	3.9	7.1	2.5	5.7	1.0	2.3
7	?	?	7.1	18.0	3.8	6.9	2.3	5.2	0.9	2.1
6	?	?	?	?	2.6	4.7	2.0	4.5	—	—
5	Das Seismogramm kann wegen Störung nicht ausgewertet werden									
4	6.4	18.7	5.2	14.3	2.2	4.0	1.2	2.7	—	—
3	5.9	17.2	4.6	11.5	1.7	3.1	0.9	2.1	—	—
2	5.8	17.0	4.2	10.5	1.6	2.9	0.9	2.1	—	—
1	3.7	10.8	3.0	7.5	—	—	—	—	—	—

Versuchsreihe 6. Fallgewicht: Walze 117 kg. Sprengung: 110 g Schwarzpulver, 0.70 m tief eingegraben. Seismometer: Harte Regulierung. Seismometerkonstanten:

Fallversuch: Eigenperiode $T_0 = 0.0400$ sec; $V = 2.01 \cdot 10^6$
Sprengung: „ $T_0 = 0.0410$ „; $V = 1.91 \cdot 10^6$

Mit der Walze wurden drei Fallversuche bei 10.65 m Fallhöhe vorgenommen. Die Zahlen bedeuten Mittelwerte der drei Versuche.

Einsatz	Fallversuche				Sprengung			
		Wahre Bodenbewegung				Wahre Bodenbewegung		
	Einsatzzeit sec	Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Beschleunigung Milligal	Einsatzzeit sec	Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Beschleunigung Milligal
i_2	0.179	?	?	?	0.179	?	?	?
i_3	0.296	0.047	?	?	0.297	0.056	?	?
i_4	0.446	0.047	?	?	0.446	0.052	?	?
i_5	0.609	0.043	6.4	13.8	?	0.052	9.6	14.2
i_6	0.903	0.046	4.3	8.1	?	0.049	6.7	11.2
i_7	1.89	0.047	0.5	0.9	1.89	0.052	1.4	2.1
i_8	2.6	0.045	0.2	0.4	2.6	0.042	0.4	0.9
i_9	—	—	—	—	3.2	0.05	0.2	0.3

Der erste Einsatz i_1 konnte, wie schon erwähnt, wegen der Größe der Ausschläge nicht ausgemessen werden. Es sei hier nur schätzungsweise die Bodenbewegung des ersten Einsatzes beim Sprengversuch angegeben. Der Lichtpunkt bewegte sich nach Schätzung etwa 100 mm von der Ruhelage fort, bei einer Periode von etwa $^1/_{50}$ Sekunde. Dies bedeutet für die wahre Bodenbewegung eine Amplitude von 50 $\mu\mu$ und eine maximale Beschleunigung von 500 Milligal.

Für die Abhängigkeit der Amplituden von der Fallhöhe zeigen die Tabellen, daß die Amplituden proportional der Wurzel aus der Fallhöhe zunehmen, und zwar ist der Proportionalitätsfaktor etwas kleiner als 1. Die Amplituden der verschiedenen Versuchsreihen sind nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, wie im nächsten Abschnitt gezeigt werden wird.

b) Fünf Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleiner Fallhöhen. Bei diesen Versuchen wurden die Fallgewichte und Fallhöhen so klein gewählt, daß sämtliche Amplituden, auch die des ersten Einsatzes, so klein sind, daß sie nicht über das photographische Papier hinausgehen. Außerdem wurde versucht, eine untere Grenze für die Empfindlichkeit des Seismometers festzustellen. Das Seismometer besaß harte Regulierung. Die benutzten Fallgewichte betrugen 0.5, 1, 2, 5, 10 und 20 kg. Mit jedem dieser Gewichte wurde ein Fallversuch gemacht, zunächst am ersten Tage mit einer Fallhöhe von 0.25 und 0.50 m, sodann zwei Tage später mit den Fallhöhen 0.75, 1 und 1.25 m. Der Sand, mit dem der Trichter an der Fallstelle gefüllt ist, war bei

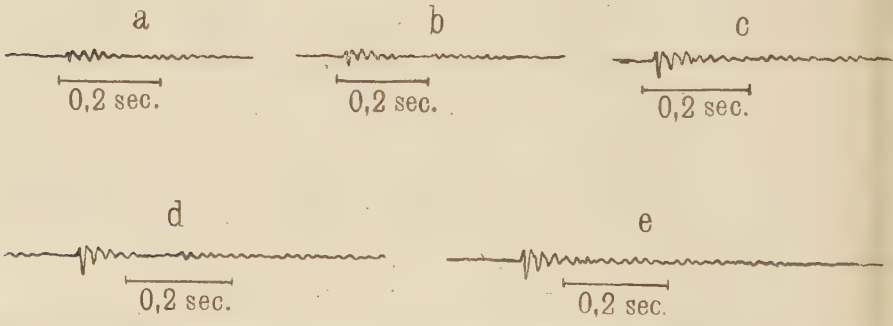

Fig. 4. Aus Versuchsreihe 7 bis 11. Fallgewicht: 2 kg; Fallhöhe: a) 0.25 m; b) 0.50 m c) 0.75 m; d) 1.00 m; e) 1.25 m. Seismometer: Harte Regulierung.

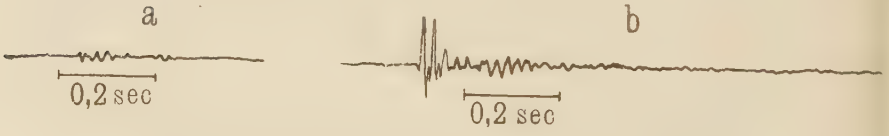

Fig. 5. Aus Versuchsreihe 11. Fallhöhe: 1.25 m; Fallgewicht: a) 0.5 kg; b) 20 kg. Seismometer: Harte Regulierung.

diesen Versuchsreihen schon ziemlich fest geworden infolge der langen Lagerung. Die Aufschlagfläche wurde bei jedem Versuch geebnet und dann leicht festgeklopft, so daß für sämtliche Versuche die gleiche Bodenbeschaffenheit erreicht wurde.

Von sämtlichen Fallversuchen wurden Seismogramme erhalten, auch von dem kleinsten Fallversuch von 0.5 kg Fallgewicht und 0.25 m Fallhöhe. Da dieser Versuch, wie alle anderen, in 125 m Entfernung vom Seismometer vorgenommen wurde, so ist dies ein Beweis einerseits für die außerordentliche Empfindlichkeit des Seismometers und andererseits für die große Ruhe des Bodens. Allerdings hebt sich das Seismogramm nur wenig aus der Bodenunruhe heraus und ist nur dem geübten Auge zu erkennen. Die Bodenunruhe besaß an diesem Tage Amplituden von $^1/_4$ bis $^1/_5$ mm.

Bei den kleinsten Gewichten und Fallhöhen besteht das Seismogramm aus einem ersten Einsatz und ein paar Wellen, bei den größeren Versuchen sind

noch einige weitere Einsätze angedeutet. Die erste Bodenbewegung des ersten Einsatzes ist ein Stoß von unten nach oben. Die Bodenbewegung ist hierbei noch verhältnismäßig langsam. Bei den Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleinen Fallhöhen ist diese Phase nur schwach angedeutet und bei den ganz kleinen Versuchen nicht zu erkennen. Bei den im vorigen Abschnitt besprochenen größeren Versuchen erfolgt die Bewegung des Lichtpunktes zwar fast senkrecht zur Ruhelinie, doch ist die Bewegung noch so langsam, daß bei allen Versuchen noch ein deutlicher Eindruck auf dem photographischen Papier hinterlassen wurde. Nur bei den Fallversuchen mit der Walze von 117 kg aus 10.65 m Höhe und bei dem Sprengversuch hat der Lichtpunkt dabei das photographische Papier verlassen. Diese Bewegung des Erdbodens von unten nach oben wird dann plötzlich abgelöst durch die entgegengesetzte Bewegung von oben nach unten. Hierbei erfolgt die Bewegung sehr viel schneller, der Lichtpunkt hinterläßt bei den großen Versuchen des vorigen Abschnittes fast gar keinen Eindruck, außerdem verläßt er auf beiden Seiten das Papier.

Der außerordentlich große Einfluß der Bodenbeschaffenheit auf das Ergebnis der Versuche ergibt sich aus folgendem Vergleich. Der eine Versuch gehört zu der Versuchsreihe 4 des vorigen Abschnittes und war dort einer der kleinsten Fallversuche, der andere gehörte zu der Versuchsreihe 11 dieses Abschnittes und war hier der größte Fallversuch. Die Diagramme sind in Fig. 2 d bzw. Fig. 5 b dargestellt. Beide Versuche erfolgten mit dem Fallgewicht von 20 kg und derselben Fallhöhe von 1.25 m; in beiden Fällen besaß das Seismometer harte Regulierung. Die Versuche liegen zeitlich etwa fünf Wochen auseinander, der zeitlich erste Versuch gehört zu den Versuchen des vorigen Abschnittes. Der Sand an der Aufschlagstelle hatte bei dem ersten Versuch noch eine lockerere Beschaffenheit als bei dem zweiten Versuch. Die Auswertung des ersten Einsatzes ergibt folgendes:

		1. Versuch	2. Versuch
Perioden in Sekunden		0.018	0.018
Wahre Bodenbewegung	Amplituden in $\mu\mu$ . . .	6.0	2.4
	Maximale Beschleunigung in Milligal	74	30

Dieses Ergebnis zeigt, daß die einzelnen Versuchsreihen nicht ohne weiteres miteinander zu vergleichen sind.

Umstehende Tabelle 4 enthält die Auswertungsergebnisse des ersten Einsatzes i_1.

Die Periodenmessungen für den ersten Einsatz lehren folgendes: Die Perioden steigen bei jeder Versuchsreihe, also bei konstanter Fallhöhe, mit der Größe der benutzten Gewichte, und zwar um etwa 40 Proz. Andererseits aber bleiben die Perioden nahezu konstant, wenn man dasselbe Gewicht, aber verschiedene Fallhöhen betrachtet. Um die Abhängigkeit der Perioden von den benutzten Fallgewichten zu erhalten, sind die Mittelwerte der Perioden für dasselbe Gewicht, aber verschiedene Fallhöhen berechnet. Dieses ergibt:

Gewicht in Kilogramm	0.5	1	2	5	10	20
Perioden in Sekunden	0.0124	0.0132	0.0144	0.0154	0.0174	0.0174

Tabelle 4.

Versuchsreihe 7 und 8.

Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.0367$ sec; $V = 2.37 \cdot 10^6$.

Fallhöhe m	Fallgewicht kg	Wahre Bodenbewegung: Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Maximale Beschleunigung Milligal	Versuchsreihe
0.25	0,5	0.013	0.16	3.8	7
	1	0.013	0.25	5.9	
	2	0.014	0.33	6.7	
	5	0.015	0.44	7.8	
	10	0.016	0.56	8.8	
	20	0.017	0.49	6.8	
0.50	0.5	0.012	0.21	5.8	8
	1	0.012	0.39	10.8	
	2	0.015	0.57	11.1	
	5	0.016	0.78	12.2	
	10	0.018	0.93	11.5	
	20	0.018	0.93	11.5	

Versuchsreihe 9, 10 und 11.

Seismometerkonstanten: Eigenperiode $T_0 = 0.0382$ sec; $V = 2.25 \cdot 10^6$.

Fallhöhe m	Fallgewicht kg	Wahre Bodenbewegung: Periode sec	Amplitude $\mu\mu$	Maximale Beschleunigung Milligal	Versuchsreihe
0.75	0.5	0.012	0.23	6.5	9
	1	0.013	0.41	10	
	2	0.014	0.8	16	
	5	0.015	1.4	25	
	10	0.017	1.7	24	
	20	0.017	1.8	25	
1.00	0.5	0.012	0.28	7.8	10
	1	0.014	0.56	11.5	
	2	0.015	0.9	16	
	5	0.015	1.6	28	
	10	0.019?	1.7	18?	
	20	0.017	2.2	31	
1.25	0.5	0.013	0.27	6.5	11
	1	0.014	0.65	13	
	2	0.014	1.1	21	
	5	0.016	1.7	27	
	10	0.017	2.3	31	
	20	0.018	2.4	30	

Dann sind berechnet worden die Mittelwerte der Perioden für dieselbe Fallhöhe, aber verschiedene Gewichte. Dieses ergibt die Abhängigkeit der Perioden von der Fallhöhe:

Fallhöhe in Metern	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25
Perioden in Sekunden	0.0147	0.0152	0.0147	0.0153	0.0153

Während im ersten Falle die Perioden mit den benutzten Fallgewichten ansteigen, bleiben sie im zweiten Falle trotz Ansteigens der Fallhöhe nahezu konstant. Es kann also die Periode des ersten Einsatzes nicht oder nur sehr wenig

von der durch das Fallgewicht entwickelten Energie abhängen. Denn sonst müßte auch bei Benutzung desselben Gewichtes die Periode mit der Fallhöhe steigen. Dieses Ansteigen der Periode ist allein von dem Größerwerden der Aufschlagfläche des Fallgewichtes abhängig. Es ist deshalb der Inhalt dieser kreisrunden ebenen Aufschlagfläche berechnet und die Abhängigkeit der Periode von der Größe dieser Fläche dargestellt:

Fallgewicht in Kilogramm .	0.5	1	2	5	10	20
Inhalt der Aufschlagfläche in Quadratzentimetern . . .	15.2	22.9	39.6	72.2	100	176
Perioden in Sekunden . . .	0.0124	0.0132	0.0144	0.0154	0.0174	0.0174

Bei der Betrachtung der Abhängigkeiten der Perioden des ersten Einsatzes von Fallhöhe einerseits und Fallgewicht bzw. Aufschlagsfläche andererseits ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Fallhöhen nur von 0.25 m auf 1.25 m, also auf das 5 fache, die Fallgewichte dagegen von 0.5 kg auf 20 kg, also auf das 40 fache, und die Aufschlagflächen von 15.2 cm^2 auf 176 cm^2, also auf das 11- bis 12 fache steigen. Es war zwar ursprünglich beabsichtigt, auch bei diesen kleinen Fallgewichten die Fallhöhen weiter zu steigern, jedoch mußte der benutzte Lichtschreiber plötzlich an die Firma „Seismos“ zurückgegeben werden, da sie ihn selbst dringend brauchte. Da bis zum Abschluß der Arbeit ein guter, schnell laufender Lichtschreiber nicht wieder zur Verfügung gestellt werden konnte, mußte eine Wiederaufnahme der Versuche bisher unterbleiben. Die Tabellen zeigen jedoch, daß auch bei Erhöhung des Fallgewichtes bzw. der Aufschlagfläche auf nur das 5 fache die Perioden im Mittel schon um 0.0025 bis 0.003 Sekunden zunehmen, während bei Änderung der Fallhöhe auf das 5 fache sich im Mittel die Perioden nur insgesamt um 0.0006 Sekunden ändern. Die angedeutete Gesetzmäßigkeit darf also doch als reell betrachtet werden.

Die Amplituden und Beschleunigungen zeigen ein zunächst schnelles, dann langsames Anwachsen, sowohl in ihrer Abhängigkeit von der Größe des Fallgewichtes als auch von der Fallhöhe, in derselben Weise wie bei den Versuchen des vorigen Abschnittes.

Zusammenfassung der Ergebnisse. Das Hauptresultat dieser Arbeit besteht in dem Auftreten von neun scharf definierten Einsätzen, die sich auf den Zeitraum von etwas mehr als drei Sekunden nach dem Aufprallen des Fallgewichtes auf den Boden verteilen. Die Einsatzzeiten der einzelnen Einsätze zeigen innerhalb der Fehlergrenzen eine vollständige Unabhängigkeit von allen äußeren Einflüssen, nämlich Größe der Fallhöhe und des Fallgewichtes, d. h. also der Fallenergie und von der Einregulierung des Seismographen auf kurze oder lange Eigenperiode. Die Deutung der einzelnen Einsätze ist in der Reflexion seismischer Wellen an verschiedenen mehr oder minder tief gelegenen Unstetigkeitsflächen zu suchen, die seismischen Wellen sind dabei in Tiefen von mehreren Kilometern eingedrungen, die Reflexion an der zu erwartenden Salzschicht hebt sich besonders deutlich heraus. Die genaue Tiefe der Reflexionsflächen wird sich nach Aufstellung einer Laufzeitkurve berechnen lassen.

Die Amplituden des ersten Einsatzes sowie auch der späteren zeigen deutlich die Abhängigkeit von Fallhöhe und Fallgewicht, sie sind proportional der

Wurzel aus der Fallenergie. Eine bedeutende Abhängigkeit der Amplituden von der Bodenbeschaffenheit ergibt sich aus zwei Fallversuchen, die mit gleichem Fallgewicht und bei gleicher Fallhöhe ausgeführt, zeitlich etwa fünf Wochen auseinander liegen. Bei lockerer Beschaffenheit des Sandes an der Aufschlagstelle des Fallgewichtes sind die Amplituden etwa $2^1/_2$ mal größer als bei fester Beschaffenheit.

Die Perioden des ersten Einsatzes zeigen eine fast vollkommene Unabhängigkeit von der Fallhöhe. Das Zunehmen der Perioden des ersten Einsatzes bei den Versuchsreihen mit kleinen Fallgewichten und kleinen Fallhöhen um etwa 40 Proz. scheint seinen Grund allein in dem Größerwerden der „Impulsfläche" zu haben; die Perioden wachsen dabei von etwa $^1/_{80}$ Sekunde bis auf etwa $^1/_{55}$ Sekunde. Die Perioden der späteren Einsätze sind wesentlich größer; sie schwanken zwar etwas, doch haben sie sämtlich eine Größenordnung von etwa $^1/_{20}$ Sekunde, anscheinend unabhängig von Fallenergie und Tiefe der Reflexionsfläche. Sämtliche Perioden erweisen sich als unabhängig von der Einregulierung des Seismographen, können also nicht auf Eigenschwingungen des Seismographen zurückgeführt werden.

Die Bodenbewegung des ersten Einsatzes besteht in einem Stoß, einer Bodenbewegung von unten nach oben, die dann durch eine bedeutend schnellere Bodenbewegung von oben nach unten abgelöst wird. Bei ganz kleinen Fallenergien ist die erste Phase dieser Bewegung, der Stoß von unten nach oben, nicht mehr zu erkennen.

Die Bodenunruhe macht sich bei weicher Regulierung des Seismometers auf etwa $^1/_5$ Sekunde Eigenperiode stets bemerkbar, nachts ist sie kleiner als am Tage. Die hohe Vergrößerung des Wiechertschen Seismometers kann demnach bei dieser weichen Regulierung nicht voll ausgenutzt werden. Bei Einregulierung des Seismometers auf kurze Eigenperioden von etwa $^1/_{25}$ Sekunde, harte Regulierung, schreibt der Lichtpunkt unter günstigen Umständen eine gerade Linie auf, sodaß die Indikatorvergrößerung von 2 Millionen zur Erreichung größerer Empfindlichkeit noch weiter erhöht werden kann. Die günstige harte Regulierung konnte bei den Fall- und Sprengversuchen benutzt werden, da bei diesen künstlichen Erdbeben nur kleine Perioden von $^1/_{80}$ bis $^1/_{20}$ Sekunde ausgelöst wurden.

Die kleinste, noch meßbare Bodenbewegung des ersten Einsatzes hatte eine Amplitude von 0.16 $\mu\mu$ bei 0.013 Sekunden Periode und eine maximale Beschleunigung von ungefähr 4 Milligal. Hervorgerufen wurde sie durch den Fall von 0.5 kg aus 0.25 m Höhe in 125 m Entfernung vom Seismographen. Die Amplitude der Bodenbewegung ist hierbei von der Größenordnung eines Atomdurchmessers.

Bei den Sprengversuchen konnte zweimal eine genaue Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der longitudinalen Wellen in den obersten Muschelkalkschichten des Göttinger Hainberges durchgeführt werden. Beide Versuche ergaben übereinstimmend eine Laufgeschwindigkeit von annähernd 1700 m/sec.

Ferner zeigte sich bei den Sprengversuchen ein überaus großer Einfluß der Lage des Sprengstoffes: Ein im Sande eingegrabener Sprengkörper ergab eine

etwa 50- bis 100 mal stärkere Wirkung auf den Seismographen als ein nur oberflächlich gelagerter Sprengkörper.

Die bei jeder Versuchsreihe durchgeführten Konstantenbestimmungen zeigen, daß die Indikatorvergrößerung von der Eigenperiode des Seismographen abhängt. Mit wachsender Periode sinkt die Indikatorvergrößerung zunächst ziemlich stark; wie eine längere Zeit nach Beendigung der Versuche gelegentlich einer Umregulierung des Seismographen auf etwas längere Eigenperiode vorgenommene Konstantenbestimmung zeigt, scheint sich die Indikatorvergrößerung dabei einem Grenzwert anzunähern.

Anmerkung zu den Figuren: Die Abbildungen sind unter Zwischenschaltung einer Handpause hergestellt, die Wiedergabe kann also nicht in allen Einzelheiten getreu sein. Insbesondere konnte die wechselnde Intensität der Originalkurve, hervorgerufen durch verschieden schnelle Bewegung des Lichtpunktes, nicht nachgeahmt werden. So sind z. B. in Fig. 3, S. 18, die ersten Schwingungen, im Original nur ganz schwach angedeutet, kaum erkennbar. Die Abbildungen zeigen die Diagramme in natürlicher Größe. Ein Ausschlag auf den Diagrammen nach unten bedeutet eine Bodenbewegung von unten nach oben.

Lebenslauf.

Als Sohn des Eisenbahnoberkassenvorstehers Ferdinand Hubert und seiner Gemahlin Alwine, geb. Böttcher, wurde ich, Ferdinand Friedrich Hubert, am 12. Oktober 1892 zu Düsseldorf geboren. Ich besuchte die Oberrealschulen in Düsseldorf und Barmen und erhielt in Barmen Ostern 1911 das Zeugnis der Reife. Darauf bezog ich die Universität Göttingen, um Mathematik und Naturwissenschaften zu studieren. Michaelis 1912 ging ich nach Berlin und kehrte Michaelis 1913 nach Göttingen zurück. Im Oktober 1919 bestand ich die wissenschaftliche Prüfung für das Lehramt an höheren Schulen und erhielt in Mathematik, Physik und Chemie nebst Mineralogie die Lehrbefähigung für die erste Stufe. Nach Ableistung des zweijährigen Vorbereitungsdienstes an der Kaiser-Wilhelm-II.-Oberrealschule zu Göttingen — für einige Wochen unterbrochen durch eine Überweisung an das Gymnasium Carolinum zu Osnabrück — bestand ich daselbst im September 1921 die pädagogische Prüfung für das Lehramt an höheren Schulen und erhielt am 1. Oktober 1921 das Zeugnis der Anstellungsfähigkeit für das Lehramt an höheren Schulen. Bis Ostern 1922 war ich als Studienassessor an dieser Anstalt tätig. Dann wurde mir auf Antrag des Direktors des Geophysikalischen Instituts der Universität Göttingen, Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Wiechert, die Verwaltung der planmäßigen Assistentenstelle an diesem Institut von Ostern 1922 ab übertragen.

Während meines Studiums besuchte ich Vorlesungen und Übungen bei folgenden Herren Professoren und Dozenten: In Göttingen: Baumann, Carathéodory, Courant, Debye, Hecke, Hilbert, Husserl, Klein, Kötz, Landau, Mügge, Müller, Prandtl, Riecke, v. Sanden, Voigt, Wallach, Wedekind, Weyl, Wiechert und Windaus. In Berlin: Hettner, Knopp, Lasson, Planck, Schottky, Schwarz, Wehnelt.

Allen diesen Herren spreche ich meinen ehrerbietigsten Dank aus. Ganz besonderen Dank sage ich Herrn Geheimrat Prof. Dr. Wiechert für die Anregung zu der vorliegenden Arbeit und für die Förderung, die er derselben angedeihen ließ.